

Standortsicherheitsuntersuchung setzungsfließgefährdeter Böschungen

Von Uwe Knobloch, Ralf Plinninger, Wilfried Hüls und Rolf d'Angelo

Kohle ist ein Energieträger mit gegenwärtig zunehmender Bedeutung. In den neuen Bundesländern war Braunkohle bis 1990 Hauptenergieträger. Das Niederlausitzer Braunkohlenflöz im Bereich der Bundesländer Brandenburg und Sachsen wird seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts überwiegend im Tagebau abgebaut. Ziel des Abbaus sind die im Mittel 12 m mächtigen abbauwürdigen Braunkohlenflöze zunächst des ersten, später des zweiten Lausitzer Flözhorizonts. Diese Flöze sind stratigrafisch dem mittleren Miozän mit einem Alter von etwa 15 bis 20 Mill. Jahren zuzurechnen. Die Flöze liegen in einer Tiefe von rund 40 bis 100 m und sind in limnisch-fluviatilen Folgen von Feinsanden, Schluffen und Tonen eingebettet (8).

Nach dem Absenken des Grundwassers bis unter das Liegende wurde das Deckgebirge über dem Braunkohlenflöz abgetragen, über den offenen Tagebau mittels Bandförderung transportiert und im freien Fall verkippt (Bild 1). Die Tagebaue erreichen dabei Tiefen von bis zu 120 m. Nach Ende des Bergbaus und mit Wiederanstieg

des Grundwassers entstanden aus den Tagebaurestlöchern Seen; teilweise befinden sich diese derzeit in der Flutungsphase.

Die in den gekippten Uferböschungen der Gewässer anzutreffenden umgelagerten Sande sind aufgrund ihrer

✧ Korngrößenverteilung,

✧ Kornform und Oberflächentextur

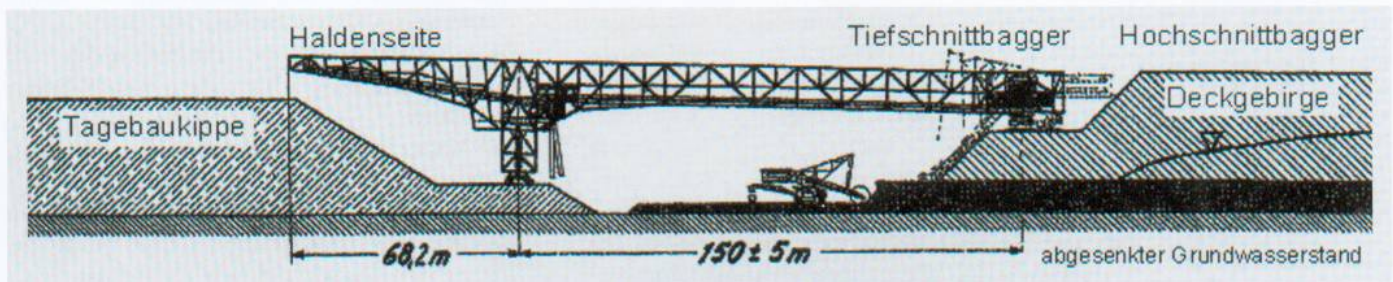
bei lockerer Lagerung und Wassersättigung als verflüssigungsgefährdet einzustufen (3, 4).

Bleiben diese Sande unverdichtet, besteht die Gefahr, dass durch Erschütterung („Initial“) die Lagerungsstruktur des Korngerüsts derart gestört wird, dass die Korn-zu-Korn-Kontakte verloren gehen (9). Das bedeutet, dass die aus der Überdeckung resultierende Vertikalspannung vorübergehend über das Porenwasser abgetragen werden muss.

Die hierbei entstehenden Porenwasserüberdrücke führen zur Bildung eines verflüssigten Boden-Wasser-Luft-Gemischs, das kaum Scherkräfte aufnehmen kann. An Böschungen wird infolgedessen eine Rutschung ausgelöst, die eine

Bild 1 Schematischer Schnitt durch einen Braunkohlentagebau.

Fig. 1 Typical cross section of open pit coal mine.



In situ Stability Assessment of Liquefiable Soils Using Controlled Vibration Tests

In large areas of the Middle Eastern part of Germany the landscape is characterized by open pit coal mining and its remains. Stability problems arise from the dumped well sorted tertiary and quaternary sands that were interbedded with the coal seams. Such slopes are highly susceptible to liquefaction. The construction of dams by either blasting or compaction by vibration is in most cases the only possibility for long term stabilisation and rehabilitation of such areas. In the case of two former open coal mine pits such measures collide with environmental aspects and the recreational use of an area that contains valuable lakes and forests and is rich in flora and fauna. The case study describes a new empirical observational approach for stability assessment including the monitoring of specific ground reactions (rise of pore water pres-

sure) as a result of defined vibrations emitted into the testing area.

Das Landschaftsbild der Lausitz wird vom Braunkohlentagebau und dessen Folgelandschaften geprägt. Die entstandenen Kippenböschungen sind bedingt durch die geologischen Verhältnisse zum großen Teil setzungsfließgefährdet. Eine Sanierung dieser Areale mittels in Spreng- oder Rütteldruckverdichtung hergestellten Dämmen ist vielfach die einzige Möglichkeit zur dauerhaften Sicherung. Beim Restlochs Mortka/Silbersee steht eine derartige Sanierung im Gegensatz zum Schutz der nachbergbaulichen Fauna und Flora und der Nutzung als Erholungsgebiet. Die Umsetzung der Beobachtungsmethode mit so genannten Initialeintragsversuchen, bei denen die Reaktion des Bodens auf kontrolliert eingebrachte Erschütterungen gemessen wird, stellt hier ein effektives Mittel zur Untersuchung und Bewertung des tatsächlichen Gefährdungspotenzials dar.



Bild 2 Setzungsfließversagen im Vorfeld einer Rütteldruckverdichtung. Höhe der Abrisskante etwa 4 m. Der bereits verdichtete Damm rechts im Bild blieb erhalten.

Fig. 2 Soil liquefaction near a vibration compaction rehabilitation measure. Height of scarp is approximately 4 m. The already compacted dam on the right hand side proved its stability.

neue Initialwirkung hervorruft und eine weitere Ausweitung der verflüssigten Zone bewirken kann.

Solche Rutschungen treten ohne vorherige Anzeichen auf und können plötzlich große Bereiche bis zu mehreren Hundert Metern ins Hinterland erfassen. Die flach abgelagerten Massen in den ausgeflossenen Bereichen dokumentieren, dass die Restscherfestigkeit in der Größenordnung von $\phi = 0,5$ bis 3° liegt (Bild 2). Triaxialversuche (CU-Versuche) bestätigen das kritische Verflüssigungsverhalten der angetroffenen Böden (5).

Die Beseitigung der Setzungsfließgefahr kann im Wesentlichen nur durch extremes Abflachen der Uferböschungen oder durch Verdichten der anstehenden Kippenböden erfolgen. Verdichtung durch Sprengen ist als wirtschaftliches Verfahren anzusehen, wegen der auftretenden Erschütterungen und Druckwellen jedoch nicht immer einsetzbar.

Setzungs- und setzungsfließgefährdete Kippenbereiche umfassten in der Lausitz zusammen genommen eine Böschungslänge von insgesamt etwa 400 km. Ein erheblicher Anteil wurde bereits saniert und einer neuen Nutzung übergeben (7).

Projektgebiet

Das hier betrachtete Untersuchungsareal ist ein Teilbereich des ehemaligen Braunkohlentagebaus Werminghoff II (Bild 3). Der Tagebau Werminghoff II wurde von 1935 bis 1960 betrieben

und beanspruchte eine Fläche von rund 745 ha. Das im Sinn wasserbaulicher Vorgaben planmäßig geflutete Tagebaurestloch wird als „Speicherbecken Lohsa I“ seit 1972 wasserwirtschaftlich und fischereiwirtschaftlich genutzt. Der westliche Teilsee trägt die Bezeichnung „Restloch Mortka“, der östliche Teilsee heißt „Silbersee“ (vgl. Bild 3). Ein Großteil der Uferbereiche beider Seen besteht aus Kippenböschungen.

Wegen der Verflüssigungsnähe der vorhandenen Materialien im Zusammenhang mit der nachgewiesenen lockeren und sehr lockeren Lagerung (Bild 4) besteht für die Kippenböschungen und für die Inselbereiche Setzungsfließgefahr. Zahlreiche bereits eingetretene Setzungsfließbrutungen belegen diese Gefahr. Die über 50-jährige Liegezeit der Kippe und die Ablagerungen im Unterwasserbereich der Böschungen mindern diese grundsätzlich bestehende Gefahr erfahrungsgemäß nicht.

Initiale für Setzungsfließbrutungen waren in der Vergangenheit mit großer Wahrscheinlichkeit Wasserströmungen und -drücke sowie Sackungen beim Grundwasserwiederanstieg. Schwingungseintrag durch Personen und Fahrzeuge sowie Brüche instabiler Böschungen können ebenso zu Setzungsfließen führen.

Im Fall eines Versagens der Böschungen beziehungsweise des Untergrunds sind gefährdet:

- ▷ Die Kippenböschungen und deren Hinterland,
- ▷ Personen, Geräte und Objekte, die sich im Versagensbereich einer Böschung oder auf nicht tragfähigem, zur Verflüssigung neigendem Untergrund befinden,
- ▷ Personen und Objekte im gesamten Uferbereich der Wasserflächen einschließlich Badestrand durch Schwallwellen,
- ▷ Fischereiwirtschaftliche Einrichtungen auf gewachsenen Böschungen im und am Wasser, Bootsstege,
- ▷ Der Auslaufkanal im Norden und der Verbindungsgraben zwischen Silbersee/Restloch Mortka und Silbersee, der durch Rutschungen abgesperrt werden könnte, sodass die Regulierung der Wasserstände behindert ist.

Die endgültige Sicherung der setzungsfließgefährdeten Kippen und Kippenböschungen kann

Bild 3 Überblick über das Projektareal. Links aktuelle Situation, rechts geologische Karte mit den ehemaligen Tagebauen.

Fig. 3 Maps of the project area. Current infrastructure (left) and geological map with former open pit areas (right).



nur durch technische Eingriffe in den Kippenkörper erreicht werden. Sowohl der Eingriff in die Natur als auch der wirtschaftliche Aufwand dafür sind erheblich. Zwischen dem Ziel der Gefahrenbeseitigung und dem Schutz der nach Stilllegung und Flutung des Tagebaurestlochs entstandenen Natur und Landschaft besteht somit ein Interessenkonflikt.

Der Braunkohlenplan als Sanierungsrahmenplan gibt als Sanierungsziel vor, dass die bergbaulichen Sanierungsarbeiten so zu führen sind, dass die ausgewiesenen Flächennutzungen vollständig und dauerhaft gewährleistet sind. Eingriffe in die Natur und Landschaft sind dabei auf das unbedingt notwendige Maß zu beschränken (10).

Sanierungs- und Verhaltensanforderungen unter Berücksichtigung der derzeitigen beziehungsweise geplanten Nutzung können erst formuliert werden, wenn das ortsspezifische Materialverhalten ausreichend genau bekannt ist.

Empirische Beurteilung des Verflüssigungspotenzials

Als empirische Methode zur Einschätzung der tatsächlichen Verflüssigungsneigung sind daher Initialversuche konzipiert und durchgeführt worden, bei denen die örtliche Reaktion des Untergrunds auf kontrolliert eingebrachte Erschütterungen beobachtet wird.

Eine erstmalige erfolgreiche Anwendung dieser Methode erfolgte im Februar 2002 im Uferbereich „Koblenzer Strand“ am Knappensee, dem im Jahr 1945 unkontrolliert gefluteten ehemaligen Tagebau Werminghoff I (1).

Darauf aufbauend wurden im Herbst 2004 im Auftrag der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) durch die G.U.B. Ingenieurgesellschaft mbH (Planung, Begleitung, Auswertung) und die IFB Eigenschenk GmbH, (Mess-, Versuchs- und Sicherungstechnik) Initialversuche in größerem stäblichem Rahmen durchgeführt. Die in insgesamt 23 charakteristischen Versuchsfeldern an den Uferbereichen des Restlochs Mortka und Silbersee durchgeführten Versuche standen dabei unter gutachterlicher Begleitung von Professor Förster.

Die Größe des im Versuch erforderlichen Initialeintrags wurde auf Grundlage langjähriger Erfahrungen im Tagebau- und Kippenbetrieb (1, 3, 4) sowie gesonderten Recherchen und Messungen (Tabelle 1) bestimmt und schließlich festgelegt (6).

Messungen der Schwinggeschwindigkeiten belegten, dass die registrierte Schwinggeschwindigkeit bei Anregung durch eine Rüttelplatte mit einem Betriebsgewicht von 320 kg deutlich über den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten möglicher Initiale liegt.

Ein typischer Versuchsfeldaufbau (Bild 5) beinhaltete dabei folgende Komponenten:

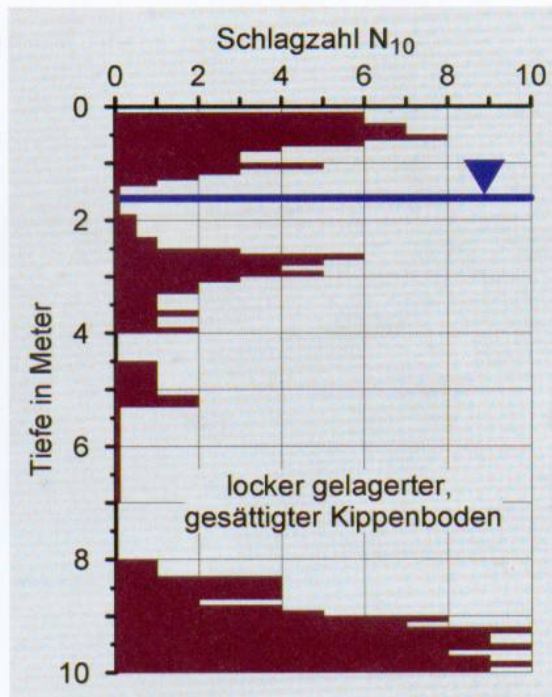


Bild 4 Beispiel für ein Rammdiagramm (Sondierung mit der leichten Rammsonde DPL-5) in setzungsfließgefährdetem Areal. In den sehr locker gelagerten, wassergesättigten Kippensanden dringt die Sonde unter ihrem Eigengewicht in den Boden ein.

Fig. 4 Example for dynamic probing (light; DPL-5) in an area susceptible to soil liquefaction. In several horizons, the probe sank into the loose, water saturated soil under its own weight.

- ✧ Nachweis eines für die Verhältnisse repräsentativen Standorts durch Bodenerkundung und Laborversuche,
- ✧ Einsatz von bis zu zwei ferngesteuerten Erschütterungsgeneratoren Rüttelplatte mit 320 kg Gewicht, Vibrationswalzenzug mit 5 t Gewicht,
- ✧ Erschütterungsmesssystem aus bis zu sechs an der Oberfläche installierten Dreikomponenten-Geophonen sowie Auswerte- und Dokumentationseinheit,
- ✧ Porenwasserdruckmesssystem aus bis zu sechs in den Untergrund eingedrückten, piezoresistiven Porenwasserdruckgebern mit Messbereich bis 1,6 bar sowie Auswerte- und Dokumentationseinheit.

Zur Minderung der Gefahr, durch die Initialversuche Bodenverflüssigungen und Setzungsfließen auszulösen, wurden Sicherheitsauflagen erarbeitet. Dazu gehörten die Messung der Bo-

Tabelle 1 Schwinggeschwindigkeiten durch Initialeintrag von Personen und einen Jeep in Abhängigkeit von der Entfernung.

Table 1 Vibration velocities v caused by persons and 4x4 vehicle at different distances from the source.

Initialeintrag durch	Koordinate	Schwinggeschwindigkeiten v [mm/s] in Abhängigkeit vom Abstand x von der Erregerquelle		
		$x = 0$ m	$x = 2$ m	$x = 4$ m
Vorbeifahrender Jeep auf unbefestigtem Weg, $v = 30$ km/h	x	–	0,2 ... 0,5	0,2 ... 0,3
	y	–	0,2 ... 0,4	0,2 ... 0,3
	z	–	0,2 ... 0,5	0,2 ... 0,3
Personengruppe (5 Personen), im Gleichtakt auf der Stelle springend	x	–	0,7 ... 0,9	0,5 ... 0,8
	y	–	0,8 ... 1,4	0,5 ... 0,9
	z	–	0,9 ... 1,5	0,5 ... 0,6
Personengruppe im Gleichtakt springend, um $x = 0$ herum aufgestellt	x	2,0 ... 2,4	0,03	0,03
	y	3,0 ... 4,2	0,05	0,03
	z	3,0 ... 3,8	0,06	0,03

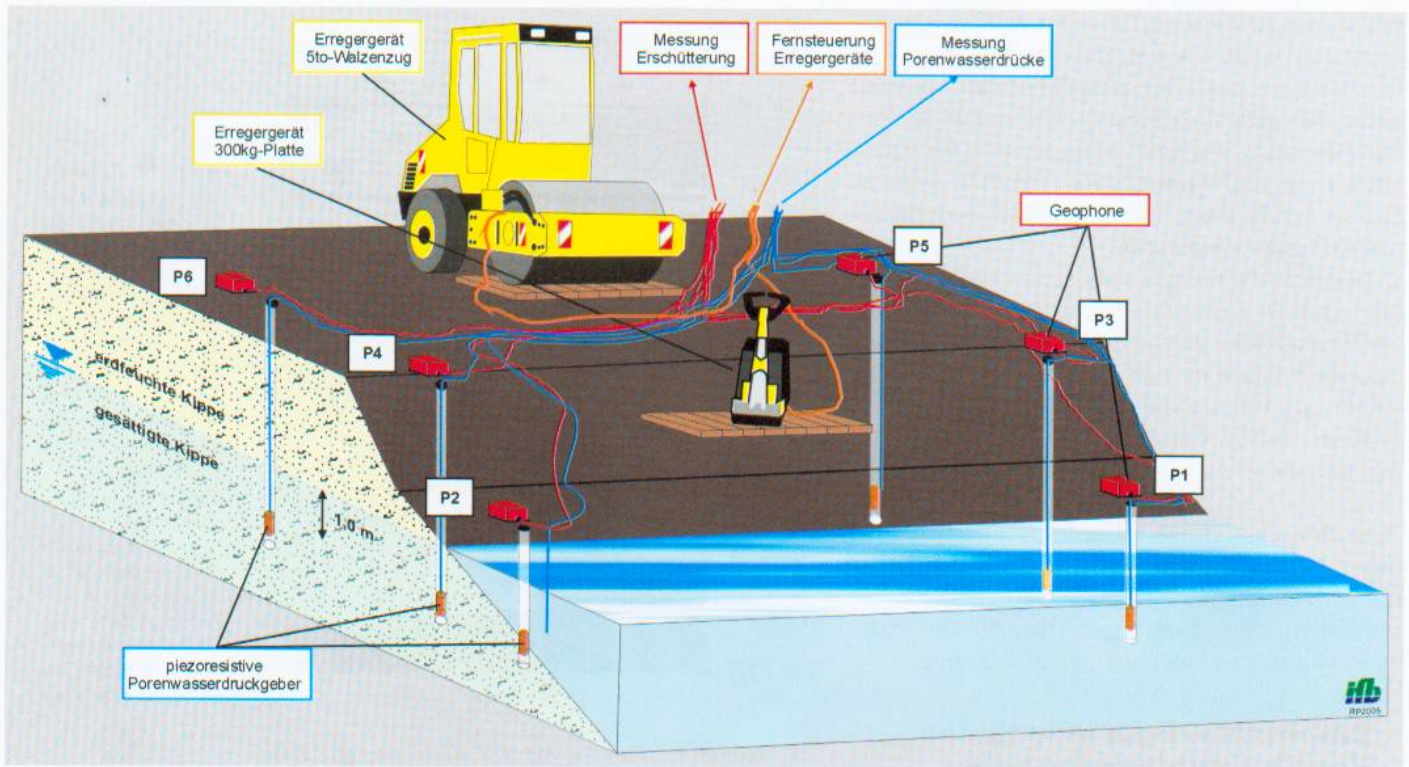


Bild 5 Schematische Darstellung der Versuchsfeldauslegung.

Fig. 5 Testing layout for the stability investigations using controlled vibrations.

Bild 6 Mobiler „Kontrollplatz“. Die Ergebnisse der Porenwasserdruck- und Erschütterungsmessungen laufen auf zwei Notebooks auf, ebenso werden von hier die 200 m entfernten Erregergeräte ferngesteuert.

Fig. 6 Mobile „control centre“. The measured pore pressure and vibration data are stored and controlled via two laptops and vibration devices are remote controlled from here.

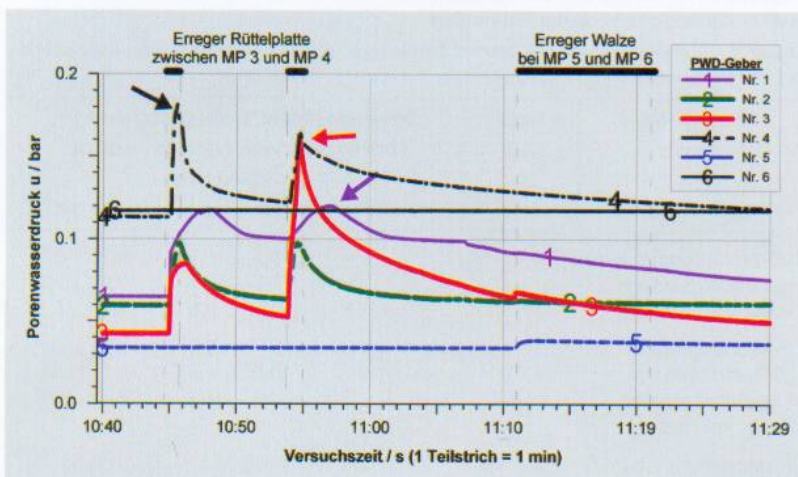


Bild 7 Beispiel für die Porenwasserdruckreaktionen während eines Versuchs mit mehreren Teilversuchen.

Fig. 7 Example for plotted pore water pressures during a 3-phase testing cycle.

denreaktion mit Porenwasserdruckgebern und deren Sofortanzeige sowie die Fernsteuerung der Erregergeräte mit Schnellabschaltung beim Erreichen kritischer Porenwasserdrücke.

Um Gefährdungen für alle Beteiligten weiterhin zu minimieren, bestand für alle Arbeiten im Gefahrenbereich Schwimmwestenpflicht. Zum Ausschluss von Gefährdungen für beteiligte und unbeteiligte Personen wurden die Rüttelplatten und der Walzenzug einschließlich Schnellabschaltung vom Kontrollplatz aus ferngesteuert. Hier erfolgte in einer Entfernung von 200 m von der Uferlinie zeitgleich die Anzeige und Kontrolle der registrierten Porenwasserdrücke und Schwinggeschwindigkeiten (Bild 6).

Vor Versuchsbeginn hatten alle Personen die festgelegten Bereiche am Ufer und im Hinterland zu verlassen. Sicherungsposten an Land garantierten, dass während der Versuchsdauer keine Unbeteiligten die Gefahrenbereiche betreten. Ein auf einem Boot postierter Rutschungsbeobachter überwachte zusätzlich den Uferbereich während der gesamten Versuchsdauer.

Während des Versuchs selbst wurde mit varierten Erschütterungseinträgen und bei ständiger Überwachung der Messergebnisse die Bodenreaktion gemessen und beurteilt. Überstieg der gemessene Porenwasserdruck im Boden den nach der Beziehung

$$u_e = \eta_u \cdot (\gamma_{\text{erd}} h_{\text{erd}} + \gamma' h_w) + (\gamma_w h_w) \dots \dots \dots [1]$$

mit

- γ Wichte der erdfeuchten Überdeckung,
- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb,
- γ_w Wichte des Wassers,
- h_{erd} Dicke der erdfeuchten Überdeckung,
- h_w Höhe Messpunkt unter Wasserspiegel,
- η_u Verflüssigungsgrad, $\eta_u = 0,5$,

vorher definierten Wert, so war der Versuch zu unterbrechen (1, 2).

Während der Versuche wurden beobachtet:

- ⇒ In 19 von 23 Versuchsfeldern wesentliche Änderungen des Porenwasserdrucks (Bild 7),
- ⇒ In 10 von 23 Versuchsfeldern grundbruch-ähnliche Absackungen der Erregergeräte (Bild 8), jedoch
- ⇒ Keine Setzungsfließbrutschungen als wesentliches Versuchsergebnis.

Die gemessenen Porenwasserdruckänderungen während der Initialeinträge betrugen bis zu $\Delta u = 0,12$ bar.

Auf Grundlage der gemessenen Porenwasserdruckreaktionen, der Wasseraustritte aus den Sondierlöchern, Rissbildungen an der Oberfläche und Tragfähigkeitsverlusten ist einzuschätzen, dass die gekippten Uferbereiche am Restloch Mortka/Silbersee weiterhin vom Grundsatz her als setzungsfließgefährdet einzustufen sind. Bei Initialen, die über den in den Versuchen getesteten Größen oder Einwirkzeiten liegen, sind daher Bodenbewegungen beziehungsweise Bodenverflüssigungen mit nachfolgenden Setzungsfließbrutschungen nicht auszuschließen. Zu diesen möglichen Initialeinträgen gehören beispielsweise Fahrverkehr, Tätigkeiten größerer Personengruppen, Badebetrieb und Bautätigkeiten jeder Art.

Deshalb wurden Verhaltensanforderungen aufgestellt und Absperrbereiche definiert, die sicherstellen, dass entweder unzulässige Initiale nicht verursacht oder Gefährdungen von Personen abgewendet werden.

Im Rahmen der gemäß Braunkohlenplan vorgesehenen Nutzung am Restloch Mortka/Silbersee ist ein Betreten der gekippten Uferbereiche durch unbefugte Personen nicht vorgesehen (10). Deshalb wird im Ergebnis der Untersuchungen zum Beispiel von der weiteren Nutzung der derzeit in diesem Bereich betriebenen Anglerstützpunkte abgeraten.

Fazit

Die Umsetzung der Beobachtungsmethode bei so genannten Initialeintragsversuchen stellt eine zielführende Möglichkeit dar, das tatsächliche Verflüssigungspotenzial setzungsfließgefährdeter Altbergaubereiche in Abhängigkeit nutzungsspezifischer Einwirkungen auch bei heterogenen Verhältnissen einschätzen zu können. Die hierbei eingesetzte Versuchstechnik und zugrunde liegende Theorie haben sich als praktisch anwendbar erwiesen.

Mithilfe von Kalibrierungen, die zwischen den eingesetzten Erschütterungsgeneratoren und natürlich auftretenden Erschütterungsquellen, zum Beispiel dem Vorbeifahren eines Geländewagens oder springende Menschen, aufgestellt wurden, war mit der im Herbst 2004 im Bereich der Restlöcher Mortka und Silbersee im Auftrag der LMBV mbH durchgeführten Versuchsserie eine zielführende und effektive Beurteilung der Standsicherheit der ehemaligen Kippenbereiche möglich.



Bild 8 Beispiel für ein eingesacktes Versuchsgerät während eines Versuchs.

Fig. 8 Example for local soil liquefaction during a test that caused the vibration device to sink into the surface.

Als Fazit ist festzustellen, dass für den untersuchten Bereich weiterhin eine potenzielle Gefährdung durch mögliche Bodenverflüssigungen und Setzungsfließbrutschungen infolge eines hohen Initialeintrags besteht.

Im Einklang mit dem Braunkohlenplan und unter Berücksichtigung allgemeiner Erfahrungen ist die Zielstellung weiterer Untersuchungen, Gefährdungen bei den vorgesehenen Nutzungen auszuschließen. Diese Zielstellung kann erfüllt werden, indem einerseits, falls erforderlich, nutzungsorientierte Sanierungsmaßnahmen durchgeführt und andererseits die festgelegten Verhaltensanforderungen eingehalten werden.

Quellennachweis

1. Förster, W.: *Belastungsversuche Knappensee*. Stellungnahme vom 28. März 2001.
2. Förster, W.: *Besonderheiten bei Arbeiten in setzungsfließgefährdeten Bereichen*. Seminar zur Weiterbildung der vom Sächsischen Oberbergamt anerkannten Sachverständigen, TU Bergakademie Freiberg, September 2005.
3. Förster, W. et al.: *Beurteilung der Setzungsfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungsfließen*. Gemeinsame Forschungsgruppe Geotechnik des BKK Senftenberg und der Bergakademie Freiberg, Sektion Bergbau, 1989.
4. Förster, W.; Gudehus, G. et al.: *Beurteilung der Setzungsfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungsfließen*. LMBV mbH, TU Bergakademie Freiberg, Universität Karlsruhe, 1998.
5. G.U.B.: *Standsicherheitsuntersuchungen für die Tagebaurestlöcher Mortka und Silbersee sowie die Gleisanlagen des Bahnhofs Lohsa*. G.U.B. Ingenieurgesellschaft mbH, Zwickau, 2001-2005.
6. G.U.B.: *Auswertung von Initialversuchen 2004 und Fortschreibung der Standsicherheitseinschätzungen in Uferbereichen am Restloch Mortka und Silbersee (Tagebau Werminghoff II)*. G.U.B. Ingenieurgesellschaft mbH, Zwickau, 2005.
7. LMBV: *Neue Ufer*. Sanierungsbericht 2004.
8. Nowel, W.: *Geologische Übersichtskarte 1:200.000 des Niederlausitzer Braunkohlereviere*. Lausitzer Braunkohle Aktiengesellschaft, 3. Auflage, 1995.
9. Redlich, A.; Terzaghi, K.; Kampe, R.: *Ingenieurgeologie*. Wien: Springer, 1929.
10. StUFA Bautzen: *Braunkohlenplan Lohsa als Sanierungsrahmenplan für den stillgelegten Tagebau Lohsa, Eintritt der Verbindlichkeit am 01.03.2002*. Regionale Planungsstelle beim StUFA, Bautzen.

Autoren

Dipl.-Ing. Uwe Knobloch, Dipl.-Math. Dr.-Ing. Wilfried Hüls, G.U.B. Ingenieurgesellschaft mbH, Büro Zwickau Katharinenstraße 11, D-08056 Zwickau, Deutschland, E-mail: info@gub-ing.de; Dipl.-Geol. Dr. rer.nat. Ralf J. Plinninger, Dipl.-Ing. Rolf d'Angelo, IFB Eigenschenk GmbH, Mettener Straße 33, D-94469 Deggendorf, Deutschland, E-mail: mail@eigenschenk.de